

解决人类终极能源问题需要哪几步

——多名院士专家深入探讨核能“三步走”战略发展，共话未来能源新篇章

“我们应该坚持‘热堆—快堆—聚变堆’核能‘三步走’战略。持续发展好热堆的同时，将快堆核能发展提上快车道，加强可控核聚变技术研发和工程示范，掌握人类终极能源的密码。”7月10日，在中国核学会主办、中国核工业集团有限公司（以下简称中核集团）承办的核能“三步走”院士论坛上，中国工程院院士叶奇蓁表示。

在我国核能“三步走”战略提出四十多年后的当下，核能“三步走”战略已进行到哪一步？核能“三步走”战略将如何开创未来能源新纪元？在核能“三步走”院士论坛上，多名院士专家深入探讨我国核能“三步走”战略发展，共话未来能源新篇章。

核电发展空间巨大

“提到我国能源资源禀赋，人们常常讲‘富煤’‘缺油’‘少气’。实际上，丰富的非化石能源资源是我国能源资源禀赋的重要组成部分。在我国进入以非化石能源为主阶段时，核能将发挥重要的基础性能源作用。”中国工程院院士杜祥琬表示。

“核电运行稳定，换料周期长，是当前乃至未来一段时间内唯一可以大规模替代化石能源的基荷电源，也是全生命周期碳排放最少的电源，在清洁替代和能源生产与消费革命的转型中具有突出的优势。从我国当前的发展阶段来看，科学、安全、有序地推动能源转型，实现‘双碳’目标离不开核能。”杜祥琬进一步解释道。

中国核能行业协会数据显示，2024年1-3月，全国累计发电量达22372.7亿千瓦时，运行核电机组累计发电量为1040.31亿千瓦时，占全国累计发电量的4.65%。

“目前，全球核电发电量占全球总发电量比例的平均值为10%，中国的核电发电量占全国累计发电量的比例小于世界平均值，并且远小于发达核电国家。我国具备完整的核能产业链，强大的科研设施和人才队伍，核电发展空间巨大。”叶奇蓁表示。

走稳热堆：创新发展核电技术

作为核能“三步走”战略的第一步，我国的热堆发展从无到有、从小到大，实现了规模化、标准化、规模化发展，由“三代”核能向“四代”核能稳步迈进。

当前，我国自主研发的具有完整知识产权的第三代核电技术“华龙一号”已实现批量化建设和海外出口。2023年12月，全球首座球床模块式高温气冷堆核电示范工程商运投产，标志着我国在第四代核电机组技术领域达到世界领先水平。

放眼未来，热堆技术将朝着更安全、高效、经济、绿色的方向发展。在叶奇蓁看来，推进耐事故燃料开发是热堆的创新发展方向之一。

“如果燃料本身具有很强的抗事故能力，就可以首先把放射性物质包容在第一道屏障内。在采用耐事故燃料后，压水堆平均卸料燃耗会有相应提升，换料



图为福清核电“华龙一号”示范工程。 ■ 中核集团供图

周期也将从18个月提高到24个月，从而节省燃料，提高燃料利用率。”叶奇蓁表示。

此外，热堆与新技术的融合发展将提升核电站整体运维效率。“利用物联网和人工智能等先进技术，开发智能化的监测和控制系统，实现对反应堆运行状态的实时监控和预测性维护。通过大数据分析，优化反应堆的运行参数，提升运行效率，降低维护成本。”中核集团“华龙一号”总设计师邢继表示。

未来的核能应用赛道还将瞄准模块化小型反应堆。“模块化小型反应堆将在工厂集成组装，可以缩短核电工期。模块化小型堆可用于偏远地区及孤立电网热电联供，替代退役热电站实现城市区域供热，并在工业工艺供热、海水淡化等方面发挥作用。”叶奇蓁表示。

走实快堆：实现核能大规模可持续发展

相比热堆技术，核能“三步走”战略的第二步——快堆具有铀资源利用率高、反应堆固有安全性高、高水平放射性废物最小化等优势。

“热堆发展比较依赖天然铀，燃烧的是天然铀中只占0.7%含量的铀-235，大部分的铀资源没有得到利用。而快堆可以利用天然铀资源中占比99%的铀-238，极大提高铀资源利用率。”叶奇蓁表示。

此外，快堆具有嬗变功能，能够在堆内消耗长半衰期、高放射性核素，实现放射性废物最小化，解决核废料难以处理等问题，是实现核能大规模可持续发展的重要选择。

“无论是实现循环经济，提高铀资源的利用率；还是嬗变高放、长寿命核废物，都需要发展快中子反应堆核电站。及时启动核能‘三步走’战略的第二步，是摆在我们面前的战略任务。”叶奇蓁表示。

在中国科学院院士叶国安看来，世界各国纷纷将快堆技术视为推动核能创新发展的重要突破口，积极制定各种政策举措抢占发展制高点。一体化快堆核能系统被视为发展先进闭式燃料循环的现实选择，将引领全球新一代先进核能技术发展。

“发展核能‘三步走’战略，要走稳热堆，走实快堆，走好聚变堆。其中，走实快堆是关键一步。”叶国安认为，“为确保我国一体化快堆研发取得成功，需要策划、实施一体化快堆国家科技重大专项，充分依托一体化快堆创新联合体、快堆产业联盟等重要平台，协同发挥国内产学研最优势力量，加速推动科技攻关和技术能力提升，为支撑国家能源安全、构建先进闭式燃料循环体系、抢占核能科技战略制高点贡献重要力量。”

走好聚变堆：点亮清洁能源之梦

万物生长靠太阳，童谣里唱的“种太阳”，正在全人类的共同努力下一点点变成现实。模拟太阳核聚变而诞生的“人造太阳”，逐渐点亮人类向往的清洁能源之梦。

作为最早参与设计国际热核聚变实验堆计划(ITER)的国家之一，我国工程、科技人员在过去的十多年里已经深入参与到ITER的建设和研究工作，加快我国磁约束核聚变及高新技术产业发展步伐。

“聚变能是无污染、无长寿命放射性核废料，资源无限的理想能源。ITER的目标就是验证托卡马克运行模式，并为将来的热核聚变示范堆和商业堆做好科学和工程技术上的准备。同时，ITER的创新和衍生产品也推动了制造业、医药等领域的发展。”国际热核聚变实验堆(ITER)组织副总干事罗德隆表示。

“人们对受控核聚变充满期待，它将给我们带来能源的未来。未来，我国将继续推动快堆和聚变堆的发展，在核能科技领域实现更大突破。力争在本世纪中叶，让核聚变在我国点亮第一盏灯。”杜祥琬表示。

下一步，核能“三步走”战略将如何走深走实？对此，中核集团党组书记、董事长余剑锋表示，要大力推动热堆发展，推动“华龙一号”技术优化，推动高温气冷堆商业化推广和多用途应用，推动小堆全球推广；加快推动快堆发展，发展百万千瓦商用快堆，推进一体化快堆研发，力争2035年前实现一体化快堆工程示范，大型后处理厂建成投产，具备商业化应用条件；积极推动聚变研发，打造世界一流的聚变平台企业，开展氦氖试验，积极布局聚变未来产业，早日建成聚变先导实验堆和商用示范电站。

“核能‘三步走’战略实施四十多年来，我国始终坚持核能安全、创新发展，核能装机规模世界领先，核能技术迈入世界第一阵营。站在新时代新起点上，要以核能‘三步走’战略推进我国核能事业高质量发展，助力全面建设核工业强国。”中国核学会理事长、党委书记王寿君表示。

程小雨

专家之声

zhuanjiazisheng

设备更新是工业企业提高产品质量、提升生产效率、塑造竞争优势的重要手段，更是工业生产迈向更加智能、绿色、低碳、安全的必然选择。根据国务院日前印发的《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》，到2027年，工业、农业、建筑、交通、教育、文旅、医疗等领域设备投资规模较2023年增长25%以上；重点行业主要用能设备能效基本达到节能水平，环保绩效达到A级水平的产能比例大幅提升，规模以上工业企业数字化研发设计工具普及率、关键工序数控化率分别超过90%、75%。

工业设备与生产能耗、环保水平密切相关。我国是工业大国，工业门类齐全，但工业装备水平参差不齐。以电机为例，目前我国电机保有量超过30亿千瓦，电机用电量占全社会用电量一半以上，但在役高效电机占比仅为20%左右。而且，很多低效、落后的设备都是超期服役，虽然经过多次改造提升，但跑冒滴漏等问题仍然不断，带来严重的安全隐患。

再看化工行业，部分早期建设的化工装置已运行较长时间，设备疲劳、管道老化、系统故障率上升等问题逐步显现，生产稳定性、设备可靠性逐年降低。2022年，上海石化“6·18”爆炸事故就是由于管道老化导致环氧乙烷泄漏并遇火源引起，事故造成1人死亡、1人受伤，直接经济损失约971.48万元。

不仅是生产设备，一些企业用于治污的环保装备也存在问题，不仅影响治污成效，还带来了新问题。去年1月至10月底，广东东莞市共发生大气污染防治设施火灾事故超过60起，其中大部分系UV光解设备起火。除了存在较大火灾隐患，UV光解设备还存在废气净化效率低、产生低空臭氧造成二次污染、灯管寿命短、能耗较高等因工艺本身难以解决的问题。因此，去年11月，东莞市生态环境局发布通知，要求在2024年9月底前，分行业逐步完成低效挥发性有机物治理设施淘汰任务。

加快设备更新 助力绿色低碳发展

■ 刘秀凤

随着污染防治攻坚战进入深水区，对污染治理设施和治理水平的要求也水涨船高，简单的小修小补已解决不了问题，必须从源头入手，进行大刀阔斧的改造。近年来，火电、钢铁、水泥等行业陆续开展了超低排放改造，在显著降低污染物排放的同时，也有效带动了环保投资。以钢铁行业为例，同2018年起超低排放实施前相比，2022年我国钢铁行业吨钢二氧化硫、氮氧化物、粉尘排放量下降了一半。全国钢铁产能集中的10个城市PM_{2.5}浓度平均下降24%，空气质量优良天数占比平均上升7个百分点，有力地促进了重点区域和全国环境空气质量改善。

随着我国经济社会进入绿色化、低碳化的高质量发展阶段，大量低效、落后的工业设备已经成为制约产业转型升级的突出短板。通过实施设备更新改造，不仅有利于扩大国内需求，还能从源头提升企业的绿色发展水平，提高生产效率，带动制造业整体竞争力的提升，为实现工业领域碳达峰碳中和目标奠定基础。

工业设备更新的主体是企业，要调动企业积极性，也要考虑企业承受力，不能简单搞“一刀切”。要坚持激励和约束并举，既要发挥市场配置资源的决定性作用，也要发挥政府的引导作用。一方面，严格落实安全生产、污染治理等强制性标准和淘汰目录的要求，加快老旧、落后设备的淘汰；另一方面，充分发挥财税、金融等措施的作用，为企业解决设备更新过程中面临的资金、用地等难题，以设备升级带动行业整体水平提升。此外，还要通过政策保障，让先进产能能在市场竞争中获得更大优势，真正实现优胜劣汰。

同时，要强化创新支撑。聚焦长期困扰传统产业转型升级的产业基础、重大技术装备等“卡脖子”难题，进行科研攻关，加快提升国内设备自主创新能力，推动创新成果应用，为工业设备更新、行业升级提供有效支撑。

中国与加蓬举行国家公园结对揭牌仪式

科学导报 7月17日，中国武夷山国家公园与加蓬洛佩国家公园结对合作揭牌仪式在中国福建武夷山举行，加蓬水和森林部部长莫里斯·恩托叙·阿洛戈希、中国国家林业和草原局(国家公园管理局)和福建省人民政府负责人出席揭牌仪式并致辞，武夷山国家公园福建省、江西省有关管理部门负责人参加。

中方代表指出，此次中加两国国家公园结对合作正式揭牌，具有里程碑意义。在中加两国建交50周年之际，两国国家公园结对合作彰显了双方齐心协力、共创绿色发展的良好愿景，展现了两国国家公园合作领域的巨大潜力和旺盛生命力，势必成为两国林业部门合作的新起点和新亮点。下一步，中国国家公园管理局将坚定不移贯彻落实习近平生态文明思想，以此次结对揭牌为契机，与加方共同努力，开展业务交流、推动联合研究，继续深化两国国家公园建设管理合作。

加方代表表示，此次国家公园结对合作揭牌，是两国在生态保护和促进可持续发展方面的务实行动，加深了两国之间的友谊。加蓬愿与中方携手努力，共同保护两国文化和自然遗产，协调自然资源管理与社区居民需求，鼓励科学研究和创新，提升公众对国家公园等自然保护地的认知。加蓬希望借鉴中国经验，增强在国家公园规划、生态旅游以及洛佩国家公园岩画管理、保护和价值提升等方面的能力。

2023年4月，中国国家林业和草原局(国家公园管理局)与加蓬水和森林部签署了《中国武夷山国家公园与加蓬洛佩国家公园结对安排》。此次结对揭牌是落实中加两国国家公园结对安排的具体工作，也是中国国家公园拓展国际合作、深化对外交流、促进互学互鉴的务实举措，对优化完善中国国家公园体系建设具有积极影响。

果叮咚 曲海华

全球最大碳市场运行3年，促进减排约9亿吨二氧化碳——

南南合作国家在武汉“取经”中国碳方案

7月21日上午9时，2024年中国碳市场大会在武汉东湖国际会议中心开幕。柬埔寨水利气象部洞里萨湖管理局矿业办公室主任许永松心情激动。

全球气候变暖造成海平面上升，柬埔寨部分海岛面临被淹没的威胁，他此行有个重要任务——为柬埔寨带回中国碳市场建设方案，找到减少二氧化碳排放的有效路径。

气候变暖，是全人类面临的共同挑战。2016年，《巴黎协定》生效，约定全球共同努力将气温升高幅度控制在2摄氏度以内。2020年，中国向世界郑重承诺，力争2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和。2021年7月16日，中国碳排放权交易市场(以下简称中国碳市场)开市。

上午10时，许永松的翻译耳机中传来声音：“中国碳市场纳入发电企业2257家，是全球覆盖温室气体排放量最大的碳市场，碳配额累计成交量达4.65亿吨，成交额约270亿元。”

许永松挥毫速记，生怕错过一个数据。此行，他作为中国碳市场建设进展与全球碳市场合作研讨班学员，和27位南南合作国家学员一同在武汉培训，学习中国碳市场的政策、行动和成效。

在他看来，中国碳市场对促进减排的成效十分明显：“2021年至2023年，中国能耗强度累计降低7.3%，减少排放二氧化碳约9亿吨。”

官方测算显示，这相当于抵消了中国一

年的汽车碳排放量。“这么大的降碳成效，中国是如何做到的？”许永松的问题，距离会场30公里外的文俊朋给出了答案。

上午11时，文俊朋打开中国碳市场信息网，开始浏览碳价。文俊朋是火力发电企业——华能武汉发电有限责任公司的环保专员，是首批参与中国碳市场交易的操盘手。

将二氧化碳排放权作为商品的碳交易，是全球公认能有效推动企业减排的市场化手段——减排企业出售多余的二氧化碳配额，超标排放的企业则需购买碳配额。

中国碳市场开市3年来，国家发放的碳配额逐年收紧，碳价也涨了快1倍。“碳市场的运行让企业减排有成本、降碳有收益，我们必须主动减排，否则买碳的成本将更高。”文俊朋介绍，公司累计投入30亿元，通过节能减排改造，每年可节约约8.5万吨标煤，减排的二氧化碳相当于1200棵树一年的吸收量。

“中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化。”尼日利亚原材料研究与发展委员会高级科学官员萨米拉·阿卜杜勒卡迪尔说，“我们想知道如何才能和中国一样，不再走先污染、后治理的工业化老路？”7月21日下午3时许，在南南国家应对气候变化研讨会上，她找到了答案。国网湖北电科院院长梅欣介绍，中国清洁能源技术的飞速发展推动了能源结构转变，中国风电、光伏产品走出国门，帮助广大发展中国家获得清洁可靠、用得起



7月21日，2024年中国碳市场大会开幕式现场。 ■ 柯皓摄

的能源。“中国是最努力的节能减排实干家。”萨米拉·阿卜杜勒卡迪尔说，几乎每个尼日利亚的城市都用上了来自中国的光伏板，中国的清洁能源产品为尼日利亚减排带来了希望，也助力全球加速迈向更清洁的世界。

下午5时，位于武汉沙湖之滨的中碳登大厦里，中碳登信息技术部部长熊鹏飞收到了巡检日报，中碳登设在北京、武汉两地的三个数据中心软硬件运行稳定，数据传输畅通。中碳登承担碳排放权注册、登记、清结算功能，3年来保障了全球最大碳市场零差错

运转。很快，监测汽车“碳足迹”的中汽碳(北京)数字技术中心有限公司将落户中碳登大厦。大厦里，一条碳金融创新、碳科技转化的产业链日益壮大，奔向未来的绿色动能越来越足。

中国碳市场扩容在即，钢铁、水泥等行业也将被纳入，更多的二氧化碳将被减排。“期待中国的减碳方案，为更多南南合作国家点亮绿色低碳发展的梦想。”武汉大学环境法研究所所长、世界自然保护联盟环境法委员会委员秦天宝说。

吴文娟 左晨 胡彦